

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610106

研究課題名(和文)超伝導の力学的検出とトポロジカル超伝導への応用

研究課題名(英文) Mechanical Detection of Superconductivity and Its Application to Topological Studies

研究代表者

白濱 圭也 (Shirahama, Keiya)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：70251486

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超流動ヘリウムの実験手法であるねじれ振り子法を超伝導に応用し、超伝導を力学的に観測する手法を確立し、トポロジカル超伝導で期待される熱流・回転交差相関効果の探索を行うことを目指した。当初の目標であった高いQ値のねじれ振り子による超伝導検出は技術的課題が大きいという結論にいたり、超伝導転移による角運動量変化をねじれ振動子のトルク測定で検出する手法の開発を進めた。またこの手法の開発に役立つ回転クライオスタットを開発し、円環状超流動 4He の第二音波に対する回転効果の測定を行い、回転速度がある閾値を超えたときに、回転停止後も量子渦がピン止めされ残留することを示唆する結果を得た。

研究成果の概要(英文)：We have applied torsional oscillator technique (TO), a gold standard in superfluid studies, to detect the mass superfluidity of superconducting electrons. We also aimed at detecting a predicted cross-correlation effect of rotation and thermal flow in topological superconductors. Our original idea utilizing high-Q TO was concluded to have difficulties to realize. We have alternatively developed another method in which angular momentum of superconducting electrons are detected by change in torque of TO. We also developed a rotating cryostat to apply rotation to superconductors, and studied the rotation effect on superfluid second sound in annular superfluid 4He . We have found a probably new phenomenon that the quantized vortices induced by rotation are strongly pinned and remained in the annular 4He after stopping rotation.

研究分野：低温物理学

キーワード：低温物性 超伝導 超流動 トポロジカル超伝導 トポロジカル超流動 交差相関

1. 研究開始当初の背景

超伝導は、常に物理学の発展を牽引する最先端テーマであり続けている。これは新しい超伝導体が常に新しい物理概念を創出してきたことによる。21世紀に入っても、鉄系超伝導の発見や「トポロジカル超伝導」の提案、硫化水素の高圧下での200K超伝導の観測など、常識を覆し研究者の興味を惹くテーマが続々と現れている。

従来、超伝導の実験はほとんど電磁気学的な手法で行われてきた。これは超伝導が「電荷の超流動」であることを暗に利用している。しかし、電子は電荷だけでなく質量を持つので、液体ヘリウムや冷却原子のように「質量の超流動」としても観測できるのではないだろうか？これは古くに重要な問題とされ、超伝導研究初期の1930年代にBeckerやLondonによって考察された(F. Londonの教科書Superfluids I(Superconductivity))。超伝導体を回転させると、表面近傍で磁場侵入長程度にある電子は、回転に追従せず、「質量超流動」を示すことがロンドン方程式より結論される。この「電子の質量超流動」によって、超伝導体内部に磁場が発生する。この磁場は「ロンドンモーメント」として知られ実験的にも確立している。ロンドンモーメントは、クーパーペアの質量測定や、一般相対論を検証する人工衛星搭載の超伝導ジャイロ実験(Gravity Probe B)などに利用されてきた。

つまり電子の「質量超流動」は、電磁気的手法では確認されている。しかし、電子の質量超流動を「純粋に力学的に」観測する可能性は、これまで誰も真剣に考えなかった。

本研究は、百年の歴史を持つ超伝導の研究で、初めて超伝導状態を「質量の超流動」として直接検出しようという試みである。これは純粋にアカデミックな問題であること以上に、最近の超伝導研究の大きな潮流である、トポロジカル超伝導における表面アンドレエフ束縛状態の研究に役立つと期待され、超伝導の実験技術に斬新なアイデアを提示する研究である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超流動ヘリウムの典型的実験手法であるねじれ振り子法を超伝導研究に応用し、超伝導を力学的に観測する手法を確立すると共に、トポロジカル超伝導で理論的に提案されている、熱流・回転交差相関効果の探索を行うことである。

超伝導体表面から磁場侵入長程度の深さの電子は、超伝導物質の振動に追従せずに、電子の質量超流動として検出される可能性がある。更に、ねじれ振り子では超伝導物質に誘起された角運動量を高精度で観測できることから、最近トポロジカル超伝導体に対して予言されている、熱流と角運動量の交差相関効果(円柱資料軸方向に温度差を与えると、円周方向に角運動量を生じる効果、及び

その逆効果)を実験的に探索する。

具体的には、質量超流動としての検出は、超伝導体の表面近傍の電子に限られる。これは以下のような機構による。超伝導体を回転あるいは振動させると、正電荷を持つ結晶格子が回転して電荷の流れが生じ、これが時間的に変動する磁場を生み出す。この磁場が負電荷を持つ電子を即座に回転に追従させ、正電荷の流れは打ち消される。従って超伝導電子は、全ての原子が容器の回転に追従しない超流動ヘリウムのように振る舞うことはない。しかし、この追従現象は試料の表面近傍では不完全になり、電子の一部分は回転に追従せず置いていかれる。つまり試料表面の電子だけは超流動になったように見える。別な見方をすると、回転する超伝導体でもロンドン方程式が成り立って、電子の運動量はゼロにならねばならない。従って回転による運動量を打ち消すように、試料表面の超伝導電子が(超流動となって回転せずに)ベクトルポテンシャルを生み出す。つまり電子の質量超流動状態が生じる機構は、マイスナー効果と本質的に同じである。

この現象を利用すると、質量超流動の検出技術を超伝導体の表面状態測定に応用できる可能性が生じる。トポロジカル超伝導では表面にアンドレエフ束縛状態が形成され、これがバルク部分と異なる性質、特にマヨラナ粒子の発現をもたらす可能性が指摘されている。今後、新しいトポロジカル超伝導体が続々と合成されると期待される。本研究はトポロジカル超伝導研究の新しい実験技術を提供しうる。

3. 研究の方法

力学的振動子としての高いQ値を持つ、ベリリウム銅(BeCu)、アルミニウム5056合金、コインシルバー(AgCu)を用いてねじれ振り子を製作し、低温における周波数安定度を調べる。その結果に基づき、弱結合BCS超伝導体であるアルミニウム(Tc~1.1K)、チタン(同0.5K)、イリジウム(0.1K)の円筒試料をねじれ振り子に取り付け、超伝導転移に伴う質量超流動で誘起される共振周波数の変化を検出することを試みる。

また本研究開始後に、磁場や回転の時間変化により円筒超伝導体に生じる環状電流を、試料の円筒軸方向の角運動量変化として力学的に測定するというアイデアを得た。これを調べるため、本研究とは独立に慶應義塾大学で準備した回転クライオスタット(装置全体を秒速1回転までの角速度で、温度1Kを保ちつつ回転できる)の回転安定性を調べる目的で、大きな回転効果を示す超流動ヘリウム4の円環試料に対してねじれ振り子の実験を行い、円環中の超流動音波(第二音波)に対する回転効果の研究を行った。更に、微小な角運動量を検出するための、低周波数ねじれ振り子の開発も進めた。このねじれ振り子のロッド部分は銅の微細毛管で作られ、超伝導

体の角運動量変化に伴う振動変位を超伝導 SQUID 素子を用いた高精度変位計で測定するものである。

4. 研究成果

まず、力学的振動子としての高い Q 値を持つ、ベリリウム銅(BeCu)、アルミニウム 5056 合金、コインシルバー(AgCu)を用いてねじれ振動子を製作し、低温での共振周波数安定度の測定を試みた。特に、超伝導体試料部分の軽量化を図るため、試料部分に振動電極が存在しない二重ねじれ振動子のデザインを検討し、実際に製作測定を行った。しかし、製作した二重振動子は多数の振動モードを持ち、有限要素法による振動解析から、電極や超伝導体試料そのものの歪みによる振動の影響が排除できないという結論を得た。

また、本研究と独立に進めてきた固体 ^4He やナノ多孔体中 ^4He 薄膜の超流動特性測定を目的としたねじれ振動子の実験で、従来は剛体と見なしてきた振動子重り(bob)の部分の弾性が、共振周波数に寄与することが明らかになった。超伝導転移に伴い試料は軟化することが知られており、実験ではこの効果を取り入れた解析が必要になると考えられる。

従って、当初の目標であった質量超流動の単純な原理での測定は困難が予想されると判断し、この方法とは独立に質量超流動を観測する手法を検討した。そこで着想したのが、研究方法の欄で述べた角運動量をねじれ振動子に生じるトルクとして測定する方法である。これはねじれロッドに細く長い銅毛細管を用いて、超伝導電子に生じる角運動量によるトルクを電極の微小変位として観測する。電極の変位は、初期の重力波アンテナの変位検出法として開発された、超伝導 SQUID による方法を採用した。これは超伝導体を蒸着した電極の振動による磁束密度の変化を、対向する平板上超伝導コイルループ内の磁束変化として SQUID で検出する方法で、 $10^{-15}\text{m}(1\text{fm})$ までの変位検出感度が期待できる。現在この手法によるねじれ振動子および測定系の準備を進めている。また、この技術をトポロジカル超流動体である超流動 ^3He の A 相薄膜に対して応用し、理論で予測されている自発的軌道角運動量やエッジカレントの探索も進めていく。

また、この角運動量/トルク測定実験では、試料を一方に回転させて超伝導転移温度を通過させた際の角運動量を測定することが有用である。そこで、慶應義塾大学にある 1K 回転クライオスタットの動作特性解析と安定化を進め、装着した BeCu ねじれ振動子の安定動作と温度の安定化技術を確立した。この装置を用いて、円環状超流動 ^4He 容器をもつねじれ振動子を用いて、超流動体特有の音波である第二音波とねじれ振動結合系に対する回転効果の測定を行った。その結果、回転速度がある閾値(0.2rps)を超えたときに、回転を静止後も量子渦が残留することを示

唆する結果を得た。これは予想外の結果であり、量子渦が何らかの原因で強くピン止めされていることを示唆する。これについて詳細な測定を継続中である。

以上、ねじれ振動子技術を利用した超伝導体の質量超流動および角運動量の検出法開発はまだ発展途上の段階にあるが、近い将来に確立させ、超伝導・超流動研究に幅広く応用していく。特に、トポロジカル超流動 ^3He 、トポロジカル超伝導体の質量超流動や自発的角運動量探索、熱角運動量交差相関効果の研究を進める予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

Jaeho Shin, Jaewon Choi, Keiya Shirahama, Eunseong Kim, Simultaneous investigation of shear modulus and torsional resonance of solid ^4He , Physical Review B, in press. 査読有り

[学会発表](計 11 件)

巻内崇彦、村川智、白濱圭也、超流動ヘリウム 4 第二音波の回転効果、日本物理学会 第 71 回年次大会、2016 年 03 月 22 日、東北学院大学泉キャンパス (宮城県・仙台市)

白濱圭也、高橋大輔、量子相転移近傍の ^4He 薄膜における弾性率異常、日本物理学会 第 71 回年次大会、2016 年 03 月 22 日、東北学院大学泉キャンパス (宮城県・仙台市)

K. Shirahama, D. Takahashi, T. Kogure, H. Yoshimura, R. Higashino, Anomalous Elasticity of ^4He Films at the Quantum Phase Transition, American Physical Society March Meeting 2016, 2016 年 03 月 17 日, Baltimore (USA)

J. Choi, T. Tsuiki, D. Takahashi, K. Shirahama, K. Kono, H. Choi, E. Kim, Re-investigating Solid Helium under DC Rotation with a Rigid Torsional Oscillator, American Physical Society March Meeting 2016, 2016 年 03 月 16 日, Baltimore (USA)

巻内崇彦、村川智、白濱圭也、超流動 ^4He 第二音波における回転誘起ドップラー効果の観測、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 09 月 19 日、関西大学 (大阪府・吹田市)

立木智也、高橋大輔、村川智、河野公俊、白濱圭也、固体ヘリウム 4 の DC 回転下弾性率測定、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 09 月 17 日、関西大学 (大阪府・吹田市)

T. Makiuchi, S. Murakawa, K. Shirahama, The Coupling of Torsional Oscillator and Sound in Superfluid ^4He , International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2015), 2015年8月11日, Niagara Falls (USA)

巻内崇彦, 村川智, 白濱圭也, 超流動 ^4He 第二音波の回転誘起ドップラー効果, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年03月23日, 早稲田大学(東京都・新宿区)

立木智也, 高橋大輔, 村川智, 河野公俊, 白濱圭也, ねじれ振り子を用いた DC 回転下固体ヘリウムの研究, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年09月10日, 中部大学(愛知県・春日井市)

白濱圭也, 高橋大輔, 小暮隆行, 東野羅磨, 吉村仁美, ナノ多孔体中吸着ヘリウム薄膜の異常硬化現象, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年09月10日, 中部大学(愛知県・春日井市)

Keiya Shirahama, Anomalous Stiffening of ^4He Films Adsorbed on Nanoporous Glasses, 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), 2014年08月11日, Buenos Aires (Argentina)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.phys.keio.ac.jp/faculty/sirahama/sirahama-jp-en.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白濱 圭也 (SHIRAHAMA, Keiya)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：70251486